Природа раннедокембрийских кристаллических комплексов

В. С. Шкодзинский

Институт геологии алмазов и благородных металлов СО РАН, Якутск
shkodzinskiy@diamond.ysn.ru

Полученные доказательства горячей гетерогенной аккреции Земли приводят к принципиально новому решению проблемы генезиса раннедокембрийских кристаллических комплексов. Согласно этому подходу, мощное импактное тепловыделение при аккреции привело к образованию слоистого магматического океана, верхний кислый слой которого возник из малобарических остаточных расплавов придонных частей раннего океана, фракционировавших под влиянием роста давления нагрузки формирующихся верхних слоев. Затвердевание верхних частей кислого слоя привело к образованию тоналит-трондьемитовых комплексов. Гнейсы и кристаллосланцы сформировались путем опускания затвердевших приповерхностных участков вместе с накапливавшимися на них осадками и подъема на их место мафических магм. Выщелачивание приповерхностных частей затвердевших пород под влиянием кислотных эманаций магматического океана обусловило преобладание среди древнейших парапород кварцитов и высокоглиноземистых гнейсов. Вследствие затвердевания магматического океана сверху вниз изотопный возраст гнейсов с глубиной в среднем уменьшается. Всплытие остаточных расплавов различных слоев привело к эволюции магматизма древних платформ от кислого до щелочно-ультраосновного и кимберлитового. Отделение рудоносных эманаций магматического океана обусловило образование уникальных месторождений.

Ключевые слова: ранний докембрий, магматический океан, кристаллическая кора.

Genesis of Early Precambrian crystalline complexes

V. S. Shkodzinskiy

Institute of Geology of Diamonds and Precious Metals SB RAS, Yakutsk

The obtained evidence of hot heterogeneous accretion of the Earth leads to a fundamentally new solution of the problem of the genesis of Early Precambrian crystal complexes. According to this approach, a powerful impact heat release during accretion resulted in the formation of a layered global magmatic ocean. Its upper acidic layer arose from low-pressure residual melts of the bottom parts of the still shallow early ocean, fractionated under the influence of an increase in the load pressure of the forming upper layers. The solidification of the uppermost parts of the acidic layer led to the formation of the most ancient tonalite-trondyemite complexes. Gneiss-crystalshale complexes were formed from its deeper parts by lowering the crystallized near-surface areas together with sediments accumulated on them and lifting the underlying magmas of often more mafic composition in their place. Leaching of the near-surface parts of the solidified rocks under the influence of acidic emanations of the magmatic ocean caused the predominance of quartzites and high-alumina gneisses among the oldest pararocks. Due to the solidification of the magmatic ocean from top to bottom, the isotopic age of gneiss decreases on average with depth. The surfacing of residual melts of its various layers led to the evolution of magmatism of ancient platforms from acidic to alkaline-ultra-basic and kimberlite. The separation of ore-bearing emanations of the magmatic ocean caused the formation of numerous often unique deposits.

Keywords: Early Precambrian, magmatic ocean, crystalline crust.

Введение

Раннедокембрийские кристаллические комплексы составляют большую часть континентальной коры, поэтому знание их происхождения имеет основополагающее значение для решения многих проблем геологии. Однако до настоящего времени они являются самыми загадочными образованиями Земли. В соответствии с господствующей гипотезой холодной гомогенной аккреции [9, 5, 14] и принципом актуализма их считают метаморфизованными осадочно-вулканогенными толщами. Но разработать их обоснованную убедительную стратиграфию обычно не удается, что приводит к появлению представлений об их нестратифицируемости.

С позиций гипотезы холодной гомогенной аккреции непонятна природа их преимущественно кислого состава, огромного объема и большой длительности образования (около двух миллиардов лет). Невозможно объяснить происхождение кислых магм, поскольку, по экспериментальным данным, они могли формироваться только при давлении менее 0.2 ГПа. Но на соответствующей этому давлению глубине менее 7 км на холодной Земле не могла существовать магматическая температура (более 900 °C), необходимая для начала плавления первичных перидотитов. Предположения о возникновении кислых магм путем частичного плавления глубинных основных пород опровергают полное отсутствие кислых обособлений

в многочисленных ксенолитах эколлитов и изотопные данные [1] о массовом начале кислого магматизма (3.8 млрд лет назад) значительно раньше, чем основного (3.5 млрд лет).

Неясна причина выдержанной на всей Земле высокой температуры (800—850 °C) минеральных парагенезисов (монофациальности) пород, тогда как молодые метаморфические комплексы, как правило, зональны. Для них характерна регрессивная последовательность минералообразования, как в типичных магматических породах, тогда как в фанерозойских метаморфических породах прогрессивная последовательность широко распространена. Непонятно отсутствие их постепенных переходов в неметаморфизованные толщи и мощных (десятки километров) перекрывающих толщ, теплоизолирующим влиянием которых иногда объясняют высокотемпературность их минеральных парагенезисов.

Происхождение геосфер по данным о горячей гетерогенной аккреции Земли

Несмотря на использование в течение многих десятилетий гипотезы холодной гомогенной аккреции Земли, до сих пор не получено ни одного геологического доказательства ее справедливости. Наоборот, установлены многочисленные свидетельства ее горячей гетерогенной аккреции. Например, падающие метеориты плавятся и частично испаряются под влиянием импактного тепловыделения. Как показали расчеты [3], это тепловыделение было способно разогреть вещество Земли на 34 000 °C, следовательно, аккреция была горячей. Предположение о холодной аккреции является необоснованным, учитывая основополагающее значение вопроса о температуре аккреции при решении генетических проблем. Горячее формирование нашей планеты подтверждается существованием трендов магматического фракционирования в мантийных ксенолитах и в раннедокембрийских ортогнейсовых комплексах, полным соответствием изотопного возраста и температуры кристаллизации их различных пород последовательности формирования при магматическом фракционировании, проекциями наиболее древних геотермических градиентов в область очень высокой температуры (до 1000 °C) на земной поверхности и множеством других данных [7].

Резкая химическая неравновесность мантийных пород с металлическим железом в отношении хорошо растворимых в нем сидерофильных элементов [10, 3], в 20 тыс. раз большая фугитивность кислорода в них [12], распространение на Земле H₂O и CO₂, а не продуктов их восстановления железом (H₂ и CO) и другие данные [8] указывают на то, что силикатные и железные частицы никогда не были перемешаны в земных недрах, как предполагается в гипотезе гомогенной аккреции. Следовательно, аккреция была гетерогенной. Ядро образовалось раньше мантии в результате быстрого объединения железных частиц под влиянием магнитных сил [8, 11]. Магнитное поле Солнца в это время было в тысячи раз мощнее современного, поскольку оно находилось на эволюционной стадии Тау Тельца [13]. Поэтому Солнце сильно намагнитило железные частицы протопланетного диска после остывания его ниже температуры Кюри (1043 K для чистого железа), и они

быстро объединялись, подобно тому, как слипаются намагниченные мелкие железные предметы.

Полученные доказательства горячей гетерогенной аккреции Земли приводят к принципиально новому, согласующемуся со всеми данными решению генетических проблем петрологии и объясняют все загадочные особенности раннедокембрийских кристаллических комплексов. Согласно этим данным, мощное импактное тепловыделение привело к плавлению падавшего вещества и к возникновению глобального магматического океана на самой ранней стадии аккреции мантии [7]. Его придонная часть кристаллизовалась и фракционировала под влиянием роста давления нагрузки образующихся верхних частей. Кумулаты формировали мантию, а остаточные расплавы — магматический океан. Небольшая глубина раннего океана и пониженная сила гравитации на небольшой Земле обусловили низкое давление в придонном слое океана и возникновение большого объема низкобарических остаточных расплавов от толеитового до кислого состава. Это объясняет генезис и широкое распространение кислых магматических пород на Земле. Повышение температуры по мере аккреции привело к эволюции состава остаточных расплавов до ультраосновного, к возникновению слоистости в магматическом океане (рис. 1) и обратного геотермического градиента в мантии.

Рис. 1. Схема образования различных геодинамических обстановок и магм:

1 — кислых, 2 — основных, 3 — анортозитовых, 4 — щелочно-основных, 5 — щелочно-ультраосновных карбонатит-содержащих, 6 — кимберлитовых, 7 — океанических и траппов, иногда содержащих ксенолиты ядра

Fig. 1. Scheme of formation of the various geodynamic setting and magmas:

1 — acidic, 2 — basic, 3 — anorthositic, 4 — alkaline-basic, 5 — alkaline-ultrabasic with carbonatites, 6 — kimberlitic, 7 — oceanic and trap sometimes with core xenoliths

Образование кристаллических комплексов в результате остывания магматического океана

Резкое возрастание плотности в слоистом магматическом океане сверху вниз (от 2.3 до 2.8 г/см³) обусловило отсутствие в нем обширной конвекции расплавов после прекращения аккреции, поэтому он дли-

тельно остывал и кристаллизовался сверху вниз в результате преимущественно кондуктивных теплопотерь. Большая продолжительность остывания огромного магматического океана глубиной до 250 км [7] является причиной длительности (около 2 млрд лет) образования раннедокембрийских кристаллических комплексов. Как показали расчеты [8], закристаллизовавшиеся верхние части магматического океана вместе с начавшими формироваться на них осадками часто становились плотнее нижних жидких. Поэтому они иногда тонули, и на их место изливались нижние, обычно более мафические магмы. Это объясняет чередование ортогнейсов, парагнейсов и основных кристаллических сланцев в большинстве раннедокембрийских комплексов. Выделение из магм кислотных газов (HCl , HF , H_2S и др.) приводило к кислотному выщелачиванию затвердевших приповерхностных пород, что обусловило широкое развитие высокоглиноземистых гнейсов и кварцитов среди паропород. По мере снижения температуры в ранних горячих водоемах начали возникать карбонатные породы. Вследствие выравнивания рельефа затвердевавшего магматического океана и небольшого еще количества воды на земной поверхности пластичный приповерхностный слой океана сравнительно мало подвергался процессам механической дезинтеграции. Это является причиной незначительного распространения конгломератов и терригенных пород среди наиболее ранних осадков.

В магматическом океане самый верхний слой был наиболее кислым по составу и поэтому наименее плотным, благодаря чему он первым затвердевал и его части реже тонули после затвердевания. Это объясняет самый древний возраст тоналит-гранодиоритовых комплексов (обычно более 3 млрд лет) и редкое наличие в них тел основных кристаллических сланцев и паропород. Они подвергались процессам дробления при завершавшей аккрецию гигантской метеоритной бомбардировке. Поэтому на начальной стадии затвердевания на поверхности магматического океана плавали полукристаллизованные тоналит-гранодиоритовые острова. Между ними находились начавшие кристаллизоваться преимущественно эндиоритовые и кварцдиоритовые магмы. При последующем остывании закристаллизовавшиеся части этих магм периодически тонули, на их место всплывали подстилавшие, обычно более мафические расплавы, что в итоге приводило к образованию неоднородных по составу кристаллических комплексов.

Более поздняя кристаллизация является причиной пониженного (2.8–1.8 млрд лет) изотопного возраста комплексов. Еще меньше возраст в более глубоких дифференциатах магматического океана (до 1.1 и 0.75 млрд лет в среднем в ксенолитах эцлогитов и пироксенитов из кимберлитов [7]). Это обусловлено более поздним остыванием и кристаллизацией глубоких частей магматического океана по сравнению с малоглубинными. Следовательно, в раннедокембрийских кристаллических комплексах, в отличие от осадочно-вулканогенных толщ, изотопный возраст не повышается с ростом глубины положения их в разрезе земной коры, а в среднем понижается. Это противоречит общепринятому принципу Н. Стенона, согласно которому верхний слой является более молодым по сравнению с нижним. Поэтому накопление изотопных

данных привело к опровержению разработанных на основе принципа Н. Стенона стратиграфических схем раннедокембрийских комплексов. Это опровержение является кажущимся, поскольку исходное вещество (расплав) подстилающих комплексов обычно является более древним, чем перекрывающих. Но минеральные парагенезисы более молодые, что и отражает изотопный возраст. Невозможность объяснить это явление сильно затормозило решение генетических вопросов, поэтому раннедокембрийские комплексы иногда называли окаменевшей бессмыслицей. Гистограммы распределения температуры в гиперстеносодержащих и безгиперстеновых гнейсах (рис. 2) не различаются. Это указывает на то, что образование пород, относимых к гранулитовой фации, обусловлено меньшим содержанием воды в исходных магмах и не связано с их большей высокотемпературностью, как обычно принимается. Это подтверждается частым переслаиванием гиперстеновых и безгиперстеновых гнейсов в одних и тех же обнажениях и отсутствием явлений более позднего развития гиперстена в гнейсах [4].

Рис. 2. Гистограммы распределения температуры в гиперстеносодержащих (H) и безгиперстеновых (A) гнейсах Евразии по данным [2]

Fig. 2. Gistograms of temperature in hypersthene (H) gneiss and without hypersthene (A). According to [2]

Среди кристаллических комплексов выделяются относительно однородные, возникшие из одного слоя магматического океана, и неоднородные, образовавшиеся из вещества разных слоев. Однородные представлены тоналит-гранодиоритовыми и ортогнейсовыми комплексами. Последние в значительной мере являются кумулатами кислых магм. Среди неоднородных выделяются ортопарагнейсовые и гнейсово-кристаллосланцевые. Эти комплексы слагают основание древних платформ и кислую кристаллическую кору. Вследствие образования карбонатов при относительно небольшой температуре (видимо, менее 100 °C) содержащие их комплексы часто имеют пониженный изотопный возраст. Основные кристаллические сланцы раннего докембрия возникли из магм основного слоя магматического океана, в котором при процессах придонного компрессионного фракционирования длительно накапливались расплавофильные компоненты. Это объясняет часто высокие (до 2.7 %, рис. 3) содержания в сланцах K_2O и других расплавофильных компонентов.

Рис. 3. Соотношение K_2O и TiO_2 в базитах раннедокембрийских кристаллических комплексов (D), срединных океанических хребтов (O), платформенных рифтов (R), субдукционных областей (S). Тренды фракционирования: A — щелочной, CA — известково-щелочной, T — толеитовый [8]

Fig. 3. The ratio of K_2O — TiO_2 in rocks of Early Precambrian (D), continental rifts (R), subduction zones (S) and mid-ocean ridges (O). Trends of fractionation: A — alkaline, CA — calc-alkali, T — tholeiitic [8]

Кристаллические комплексы возникли преимущественно путем кристаллизации глобального магматического океана. Это является причиной, казалось бы, удивительной, выдержанной на всей Земле типичной для магматических пород очень высокой (800—850 °C, рис. 4) температуры их кристаллизации. С позиций холодной аккреции невозможно объяснить такую высокую температуру. Предположения о связи ее с присутствием мощных (десятки километров), изолирующих тепловой поток перекрывающих толщ противоречат отсутствию признаков существования этих толщ. Гипотезы обусловленности высокотемпературности влиянием мантийных плюмов или фрикционным тепловыделением при коллизионных процессах не согласуются с выдержанностью этой температуры на всей Земле и с отсутствием в кристаллических комплексах температурной зональности, что нашло отражение в представлениях об их монофациальности. Магматическое происхождение объясняет присутствие в них только регрессивной последовательности минералообразования и отсутствие постепенных переходов в слабометаморфизованные толщ. Постепенные переходы есть в зонально-метаморфизованных зеленокаменных толщах, но они формировались на кристаллическом основании и моложе его. Повсеместное распространение родоначального магматического океана является причиной огромного объема кристаллических комплексов и их большой мощности (десятки километров). Почти идентичный к изоконцентрам твердых фаз на P-T-диаграмме для магм (3°) наклон полосы то-

Рис. 4. Средние параметры образования кристаллических комплексов Алданского щита (A, среднее из 36 определений), Анабарского щита (An, 12 определений), Лапландского пояса (L, 11 определений), Украинского щита (U, 4 определения), Антарктиды (At, 1 определение), Урала (Ur, 10 определений), Беломорья (B, 12 определений). По данным [2]. La и Lb, Sa и Sb — соответственно ликвидусы и солидусы кислых и основных магм; La и Lb — расплавы соответственно кислые и основные; F — флюид; G — минералы гранитов; 10 % Ma и 10 % Mb — содержания соответственно кислого и основного расплавы; $Ma^{(0.1)}$ — кислый расплав с отношением количества CO_2 к H_2O , равным 0.1 [6]

Fig. 4. Average parameters of formation of crystal complexes of the Aldan shield (A, average of 36 definitions), the Anabar shield (An, 12 definitions), the Lapland belt (L, 11 definitions), the Ukrainian shield (U, 4 definitions), Antarctica (At, 1 definition), the Urals (Ur, 10 definitions), the White Sea (B, 12 definitions). According to [2]. La and Lb, Sa and Sb — respectively liquiduses and soliduses of acid and basic magmas; La and Lb — melts, respectively acid and basic; F — fluid; G — granite minerals; 10 %Ma and 10 %Mb — content, respectively, acid and basic melt; $Ma^{(0.1)}$ — acid melt with the proportion of CO_2 to H_2O is equal to 0.1 [6]

чек P- и T-параметров минералообразования в кристаллических комплексах (4°) на рис. 5 и секущее ее положение к линиям платформенного и океанического градиентов подтверждают образование этих комплексов путем кристаллизации магматического океана. Сонахождение в них всплывавшего полужакристаллизованного разнотемпературного вещества магматического океана является причиной значительных вариаций давления (0.3—1.2 ГПа), зафиксированного в минеральных парагенезисах одних и тех же комплексов. При отсутствии мощных перекрывающих толщ наличие признаков кристаллизации некоторых пород при очень высоком давлении с позиций гипотезы холодной аккреции объяснить очень трудно, в то время как существование вертикальных перемещений вещества в магматическом океане полностью их объясняет. Вследствие большей глубинности основного слоя в

Рис. 5. Соотношение расчетных [2] максимальных температур и давлений (1) и максимальных температур и минимальных давлений (2) при кристаллизации гранулитовых комплексов Евразии. О и Р — геотермические градиенты соответственно океанов и древних платформ. L — наиболее низкотемпературные параметры кристаллизации

Fig. 5. Correlation of the results of calculations [2] of maximum temperatures and pressures (1) and maximum temperatures and minimum pressures (2) during the crystallization of granulite complexes in Europe and Asia. O and P are geothermal gradients of the oceans and ancient platforms, respectively; L — the lowest temperature parameters

магматическом океане по сравнению с кислым и возрастания степени его кристаллизации с течением времени наиболее высокие давления при минералообразовании устанавливаются обычно в парагенезисах основных пород более позднего возраста.

Ввиду высокотемпературности кристаллические комплексы почти всегда мигматизированы. Выделяется два главных генетических типа мигматитов [6]. В ортогнейсах темноцветная составляющая жильного материала содержит больше гидроксилсодержащих минералов (биотита, роговой обманки) и показывает на десятки градусов более низкую температуру кристаллизации, чем в субстрате. Это свидетельствует об остаточно-магматическом генезисе такого жильного материала. В темноцветной составляющей парагнейсов содержание безводных минералов (гиперстена, граната, кордиерита) значительно выше (до 80–100 %), чем в субстрате, и температура их кристаллизации несколько больше, что указывает на заимствование воды из гидроксилсодержащих минералов при плавлении и на анатектический генезис таких мигматитов. Степень плавления определялась количеством воды, заимствованной из гидроксилсодержащих минералов. В этом случае вода являлась виртуальным инертным компонентом, по терминологии Д. С. Коржинского, и поэтому не могла привноситься в мигматизированные породы. Это противоречит широко распространенным предположениям о существовании процессов грани-

тизации под влиянием подъема глубинных флюидов. В глубинных породах нет их источников и путей для подъема. В случае существования флюидов мантия и кристаллическая кора расплавились бы и континенты утонули, так как присутствие флюидной фазы при высоком давлении на несколько сотен градусов понижает температуру плавления пород.

Процессы опускания и всплывания в разной степени остывших магм океана под затвердевшей его приповерхностной частью обусловили ее деформации и возникновение на ней грабенообразных опусканий. Заполнение их вулканидами и осадками привело к образованию зеленокаменных поясов. Вследствие наиболее интенсивных и длительных перемещений магм под ранними тоналит-трондьемитовыми затвердевшими верхними частями магматического океана на них формировалось наибольшее количество зеленокаменных комплексов. В кристаллизовавшихся гнейсово-кристаллосланцевых комплексах уплотнившиеся затвердевшие верхние части периодически тонули вместе с начавшими на них формироваться осадками. Поэтому зеленокаменные толщи на них не формировались. Это объясняет загадочное почти полное их отсутствие в участках развития нетоналит-трондьемитового кристаллического основания.

Незначительная степень затвердевания нижнего перидотитового слоя магматического океана обусловила подъем из него расплавов и формирование коматиитов в наиболее ранних зеленокаменных поясах. Позже, после значительной кристаллизации этого слоя, образование коматиитов прекратилось. Под влиянием горячего основания зеленокаменные комплексы обычно зонально метаморфизованы с преобладанием зеленокаменной фации метаморфизма. Вследствие пониженной температуры кристаллизации их изотопные системы часто закрывались раньше, чем в подстилающих кристаллических комплексах. Это объясняет кажущиеся парадоксальными их иногда более древние изотопные датировки по сравнению с нижними комплексами.

Зеленокаменные толщи и зонально-метаморфические комплексы молодых складчатых областей по сравнению с раннедокембрийскими кристаллическими комплексами имеют совершенно другое, немагматическое происхождение. Это указывает на необходимость учета их различного генезиса, а не обычно принятого одинакового осадочно-вулканогенного. Вследствие стремления сохранить по инерции всплывавшими струями мантийного вещества пониженной линейной скорости вращения, типичной для глубинных частей Земли, они смещали на запад затвердевшие верхние слои магматического океана. Это привело к более широкому распространению в кристаллических комплексах восточных падений различных типов линейности по сравнению с западными и субмеридиональными, к преимущественно субмеридиональному простиранию комплексов, широкому распространению надвигов и, видимо, к возникновению ранних протоконтинентов в результате скупивания протокры в субэкваториальных областях, где влияние силы Кориолиса было максимальным.

Всплывание остаточных расплавов из различных слоев магматического океана привело к эволюции магматизма на древних платформах от кислого до щелоч-

но-основного, щелочно-ультраосновного карбонатит-содержащего и кимберлитового. Остывание и кристаллизация слоистого магматического океана сверху вниз является причиной значительно более позднего изотопного возраста более глубоких кимберлитов (в среднем 236 млн лет) по сравнению с карбонатитами (688 млн) и другими магматическими породами древних платформ. Высокая степень кристаллизации (более чем на 99.9 %) мощного (около 80 км) пикритового слоя магматического океана (см. рис. 1) при образовании карбонатитовых остаточных расплавов обусловила уникально высокие (до целых процентов) концентрации в карбонатитах рассеянных элементов, которые в других магматических породах присутствуют в незначительном (г/т) количестве. Накопление углерода в остаточных расплавах придонного перидотитового слоя привело к очень раннему (около 3.5 млрд лет назад) началу кристаллизации алмаза в кимберлитах. Рост вязкости этих расплавов в тысячи раз по мере накопления в них многовалентных элементов при фракционировании обусловил постепенную смену послонного тангенциального роста алмазов на радиальный, эволюцию морфологии их формирующихся кристаллов от октаэдрической до ромбододекаэдрической и кубической и рост содержания в них примесей, в том числе азота и легкого изотопа углерода. Раздвижение континентальной литосферы растекавшимся веществом плюмов при формировании океанических областей является причиной отсутствия карбонатитов и кимберлитов в этих и субдукционных областях и наличия их только в участках присутствия раннедокембрийской кристаллической коры (правило Клиффорда).

Таким образом, всплытие остаточных расплавов различных слоев магматического океана полностью объясняет происхождение, состав, рудоносность и последовательность образования магматических пород древних платформ. Это противоречит господствующей гипотезе магнеобразования путем обособления выплавов в подплавленных породах. Степень плавления мантийных перидотитов принимается небольшой (0.1–15 %), так как при большой степени состав выплавов не соответствует составу природных магм. Но при небольшой степени плавления породы имеют огромную вязкость порядка 10^{20} – 10^{22} пуаз (рис. 6). Как показали расчеты по формуле Стокса [6], при такой большой вязкости выплавки за всю историю Земли (4.5 млрд лет) всплывут всего на доли сантиметра, что не способно привести к магнеобразованию. Это подтверждается автохтонностью анатектического материала в единственно доступном изучению примере природного массового частичного плавления — в мигматитах [6].

Подъем рудоносных эманаций магматического океана обусловил образование оруденения, огромный объем которого привел к возникновению уникально крупных месторождений (Витватерсранд, Курская магнитная аномалия и др.). Рудные эманации размещались преимущественно в понижениях формировавшихся зеленокаменных поясов и осадочных бассейнов, что объясняет приуроченность к ним большинства месторождений.

Вследствие расплавленного состояния на ранней земной поверхности сначала не могли существовать водоемы. Падение богатых водой планетезималей так-

Рис. 6. Вязкость гранитных магм (η , пуаз): 1 — стекла, 2, 3 — рассчитанная по формулам Эйнштейна — Роскоу при неодинаковых и одинаковых размерах твердых шаров, 4 — астеносферы, 5 — земной коры, 6 — принятая [6]

Fig. 6. Viscosity of granitic magmas (η , puas): 1 — glass, 2, 3 — calculated according formula Einstein — Roskou for different and identical size of hard spheres, 4 — asthenosphere, 5 — earth's crust, 6 — accepted [6]

же не приводило к их возникновению, как часто предполагается, поскольку в это время земная поверхность еще была покрыта магматическим океаном. Небольшое количество воды находилось в парообразном состоянии. Пар постоянно терялся в космическом пространстве под влиянием солнечного ветра. По мере остывания и кристаллизации магматического океана происходило отделение из его расплавов паров воды, их конденсация и формирование водоемов, сначала мелких и горячих, затем все более холодных и крупных. Как показали расчеты [8], для образования всей имеющейся на земной поверхности воды достаточно выделения примерно 0.45 % воды из магматического океана глубиной 250 км. Концентрация воды в природных магмах обычно составляет около 1 %, поэтому запасов ее в магматическом океане было вполне достаточно для возникновения всей земной гидросферы.

Судя по внедрению кимберлитовых остаточных расплавов до мелового периода, практически в течение всей истории Земли происходило отделение воды из расплавов магматического океана и образование гидросферы. Она формировалась постепенно. В докембрии воды на земной поверхности было очень мало и она заполняла только мелкие водоемы. В это время не было обширных океанов, что согласуется с отсутствием крупных толщ раннедокембрийских океанических осадков. Значительные по размеру мелкие моря и океаны появились позже, в рифее, что привело к сильному затоплению континентов и образованию осадочного чехла платформ. Начавшаяся в конце протерозоя конвекция в мантии и формирование глубоких океанов в юрском периоде привели к частичному осушению континентов и возникновению их современного облика.

Вследствие существования обратного геотермического градиента в раннем докембрии не могла про-

исходить всемантийная конвекция. Поэтому отсутствовали современные геодинамические обстановки. В архее земная поверхность была покрыта магматическим океаном, и на ней с 4.55 до 3.8 млрд лет назад существовала панмагматическая геодинамическая обстановка (рис. 1). Это объясняет отсутствие на Земле пород древнее 3.8 млрд лет и кратеров завершавшей аккрецию гигантской метеоритной бомбардировки. Они присутствуют на Луне вследствие ее значительно меньшего размера и поэтому более раннего остывания. В период с 3.8 до 2.5 млрд лет существовала обстановка образования раннедокембрийских кристаллических комплексов и кислой коры в результате кристаллизации кислого слоя магматического океана. С 2.5 по 1.0 млрд лет была распространена обстановка формирования литосферы древних платформ путем затвердевания глубинных слоев магматического океана.

Судя по резко увеличившейся интенсивности геологических процессов, в конце протерозоя началась всемантийная конвекция вследствие прогрева мантии изначально более горячим ядром и возникновения в ней прямого геотермического градиента. Всплывание и растекание ее высокотемпературных нижних частей обусловили раскол и раздвижение континентальной литосферы и возникновение океанических и субдукционных геодинамических обстановок. По расчетам [8], магмы образуются в них в результате фрикционного плавления глубинных пород (дифференциатов магматического океана) под влиянием тектонических деформаций, возникающих при раздвижении океанических плит, и вследствие декомпрессии при подъеме. Это подтверждается постоянной связью процессов магомобразования с тектоническими движениями, повышенными величинами начальных отношений изотопов стронция (до 0.730 в вулканах Перу) в субдукционных и коллизионных магматитах, соответствием состава формирующихся магм составу деформируемых глубинных пород, рассчитанными количественными моделями природных магм, которые свидетельствуют о высоком (до 70–80 %) содержании в них твердых фаз в глубинных условиях под влиянием высокого давления [8], и резким возрастанием степени однородности гранитогнейсовых диапиров по мере их подъема. Большую эффективность фрикционного плавления демонстрирует интенсивный современный вулканизм на небольшом спутнике Юпитера Ио. На нем деформации недр, обусловленные влиянием переменного гравитационного притяжения то приближающихся, то удаляющихся Юпитера и спутников Европы, Ганимеда, приводят к извержению около четырехсот вулканов и существованию озер лавы размером до 200 км.

Всплывание крупных тел основных пород, возникших при заполнении придонными расплавами импактных углублений на дне синаккреционного магматического океана, привело к их декомпрессионному переплавлению и быстрому образованию огромных объемов траппов. Присутствие в наиболее ранних кратерах обломков земного ядра является причиной выноса траппами крупных (до десятков тонн) тел никелистого (до 7 %) железа (рис. 1). Значительно меньше, чем на Земле, размеры ядер на других планетах земной группы не смогли прогреть их мантии и привести к возникновению мантийной конвекции. Это объяс-

няет таинственное отсутствие на них явных признаков существования в настоящее время плитной тектоники и вулканизма.

Заключение

Таким образом, учет многочисленных доказательств горячей гетерогенной аккреции Земли приводит к принципиально новому решению проблемы происхождения раннедокембрийских кристаллических комплексов и других генетических проблем петрологии и планетологии. Эти доказательства свидетельствуют о существовании в раннем докембрии уникальной, не повторяющейся позже обстановки кристаллизации глобального магматического океана, которая обусловила специфичность и неповторимость ранних геологических процессов и раннедокембрийских кристаллических комплексов. Полученные результаты подтверждают полузабытые представления классиков петрологии Н. Л. Боуэна, П. Эскола, А. Н. Заварицкого и других о ведущей роли магматического фракционирования в формировании многообразия состава пород Земли.

Литература

1. Балашов Ю. А. Изотопно-геохимическая эволюция мантии и коры Земли. М.: Наука, 1985. 221 с.
2. Гранулитовые комплексы в геологическом развитии докембрия и фанерозоя: Материалы II Российской конференции. СПб., 2007. 407 с.
3. Рингвуд А. Е. Происхождение Земли и Луны. М.: Наука, 1982. 294 с.
4. Салоп Л. Н. Геологическое развитие Земли в докембрии. Л.: Недра, 1982. 334 с.
5. Сорохтин О. Г. Развитие Земли. М.: МГУ, 2002. 506 с.
6. Шкодзинский В. С. Проблемы физико-химической петрологии и генезиса мигматитов (на примере Алданского щита). Новосибирск: Наука, 1976. 224 с.
7. Шкодзинский В. С. Петрология литосферы и кимберлитов (модель горячей гетерогенной аккреции Земли). Якутск: СВФУ, 2014. 452 с.
8. Шкодзинский В. С. Глобальная петрология по современным данным о горячей гетерогенной аккреции Земли. Якутск: СВФУ, 2018. 274 с.
9. Шмидт О. Ю. Происхождение Земли и планет. М.: Изд. АН СССР, 1962. 132 с.
10. Harris P. G., Tozer D. C. Fractionation of iron in the Solar system // Nature. 1967. N 215. P. 1449–1451.
11. Holliday A. H. Hf-W chronometry and inner solar system accretion // Space Sci. Rev., 2000, V. 92. P. 53–63.
12. O'Neil H. S. Oxygen fugacity and siderophile elements in the Earth's mantle: implications for the origin of the Earth // Meteoritics. 1990. N 25 (4). P. 395.
13. Wikichi.ru/wiki/protoplanetary/disk (дата обращения: 10.02.2021).
14. Wood B. J. The formation and differentiation of Earth // Physics Today. 2011. V. 64. N 2. P. 40–45.

References

1. Balashov Ju. A. *Izotopno-geohimicheskaja evoluzija mantii i kory* (Isotope-geochemical evolution of the mantle and crust). Moscow: Nauka, 1985, 221 p.

2. Granulitovye komplekсы v geologicheskom razvitii dokembrija i fanerozoja. *Materialy II Rossijskoj konferenzii* (Granulite complexes in geological evolution in Precambrian and Phanerozoic). Proceedings of conference. St. Petersburg, 2007, 207 p.
3. Ringwood A. E. *Obrazovanie Zemli i Luni* (The origin of the Earth and the moon). Moscow: Nedra, 1982, 294 p.
4. Salop L. N. *Geologicheskaja evoluzija Zemli v dokembrii* (Geological development of the Earth in the Precambrian). Leningrad: Nedra, 1982, 334 p.
5. Sorohtin, O. G. *Evoluzija Zemli v Dokembrii* (Evolution of the Earth in the Precambrian). Moscow: MSU, 2002, 506 p.
6. Shkodzinskiy V. S. *Problemy fisiko-himicheskoy petrologii i genesis migmatitov* (Problems of physico-chemical petrology and genesis of migmatites). Novosibirsk: Nauka, 1976, 224 p.
7. Shkodzinskiy V. S. *Petrologija litosfery i kimberlotov (model gorjachej akkrezii Zemly)* (Petrology of lithosphere and kimberlites (model of hot accretion of the Earth)). Yakutsk: SVFU, 2014, 452 p.
8. Shkodzinskiy V. S. *Globalnaja petrologija po sovremennym dannym o gorjachej heterogennoj akkpezii Zemli* (Global Petrology based on current data on hot heterogeneous accretion of the Earth). Yakutsk: SVFU, 2018, 244 p.
9. Schmidt O. Y. *Obrazovanie Zemly i planet* (The origin of the Earth and planets). Moscow: USSR AS, 1982, 132 p.
10. Harris P. G, Tozer D. C. Fractionation of iron in the Solar system. *Nature*, 1967, No. 215, pp. 1449—1451.
11. Holliday A. H. Hf-W chronometry and inner solar system accretion. *Space Sci. Rev.*, 2000, V. 92, pp. 53—63.
12. O'Neil H. S. Oxygen fugacity and siderophile elements in the Earth's mantle: implications for the origin of the Earth. *Meteoritics*, 1990, No. 25 (4), pp. 395.
13. URL: wikichi.ru/wiki/protoplanetary/disk.
14. Wood B. J. The formation and differentiation of Earth. *Physics Today*, 2011, V. 64, No 2, pp. 40—45.

Поступила в редакцию / Received 07.09.2021